

## Estimación del índice de sitio en rodales de *Nothofagus dombeyi* a través de herramientas de teledetección espacial

Carlos Esse

Instituto de Manejo de Bosques, Producción y Medio Ambiente. Universidad Austral de Chile.

Casilla 567, Valdivia, Chile. [karlos.esse@gmail.com](mailto:karlos.esse@gmail.com)

### Resumen

La estimación del índice de sitio y la calidad del sitio constituyen herramientas básicas en la gestión de los ecosistemas forestales y la práctica de la silvicultura. El estudio de la distribución espacial y la dinámica temporal de índice de sitio y la calidad del sitio de los ecosistemas forestales aún carece de los avances tecnológicos. Este estudio propone la integración de las herramientas de teledetección para la estimación de la productividad forestal para áreas remotas. Se evaluó el potencial de aplicación de la metodología en amplias regiones y los bosques con la evaluación de la exactitud. Los resultados muestran que el índice del sitio de los bosques secundarios de *Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst., están en correlación lineal con los índices de vegetación normalizada (NDVI), índice de diferencia de vegetación ajustado (TNDVI), banda Infrarroja pura de la imagen y transformación de componentes principales. Este estudio demostró que este enfoque puede ser utilizado en la estimación de la productividad de bosques secundarios en diferentes ecosistemas forestales.

Palabras clave: sensores remotos, índice de sitio, coihue.

### Abstract

The estimation of site index and site quality are basic tools in the management of forest ecosystems and forestry practice. The study of the spatial and temporal dynamics of site index and site quality of forest ecosystems still lacks technological advances. This study proposes the integration of remote sensing tools for estimating forest productivity for remote areas. We evaluated the potential application of the methodology in large regions and forests with the assessment of accuracy. The results show that the site index of secondary forests of *Nothofagus dombeyi* correlate linearly with the normalized vegetation index (NDVI), difference vegetation index adjusted (TNDVI), pure infrared band and processing the image and principal components. This study demonstrated that this approach can be used to estimate the productivity of secondary forests in different forest ecosystems.

Key words: remote sensing, site index, coihue.

### Introducción

Para silvicultores e investigadores disponer de herramientas que permitan predecir con cierto grado de precisión el crecimiento y la producción futura de rodales y bosques es fundamental para la sustentabilidad del recurso (Esse *et al.* 2013). A fin de lograr lo anterior es necesario conocer y aplicar un sistema de uso de la tierra con fines forestales basado en un ordenamiento de clasificación (Schlatter y Gerdin 1995). De acuerdo a lo anterior se ha definido el concepto de sitio, el cual corresponde al área en donde crecen los bosques con interacción del clima, el suelo, la topografía, hidrología, vegetación y varios factores biológicos (Hampf 1965, Carmean 1979, Donoso 1981, Ortega y Montero 1988, Avery y Burkhart 1994, Mingdong *et al.* 2006). En el área de la silvicultura y manejo este concepto se entiende como la interacción entre las distintas especies forestales y las condiciones edafoclimáticas que las rodean, lo cual permite el desarrollo de técnicas orientadas a la estimación de la productividad forestal (Esse *et al.* 2007, Esse *et al.* 2013). Este concepto biológico puede expresarse matemáticamente, para lo cual se ha optado por representar la calidad de sitio a través de un valor o índice (Prodan *et al.* 1997, Esse *et al.* 2007).

El método más utilizado y que ha dado mejores resultados para estimar la calidad de un sitio, es aquel que utiliza la altura de árboles dominantes y codominantes como índice, es decir, el conocido índice de sitio, aplicable sólo en rodales coetáneos (Donoso 1981, Ortega y Montero 1988, Avery y Burkhart 1994, Prodan *et al.* 1997) como en el caso de los bosques de segundo crecimiento, conocidos en Chile como renovales. Estos últimos constituyen un recurso de gran valor e importancia, con cerca de 2,9 millones de hectáreas (Covarrubias y Contreras 2004). Son considerados económicamente muy atractivos (CONAF *et al.* 1999) debido a la buena forma de sus árboles, rápido crecimiento, y calidad de la madera, entre las especies que la constituyen están *N. obliqua*, *N. nervosa*, *N. dombeyi* y *D. winteri*, que corresponde a los principales bosques secundarios de la zona centro-sur de Chile. De ellas, *N. dombeyi* presenta buenas características para incorporarse al desarrollo económico del país.

El acelerado avance tecnológico ha permitido construir cada vez modelos más eficientes en términos de precisión y costo, en este ámbito las tecnologías SIG (Sistemas de Información Geográfica) y de teledetección han contribuido al desarrollo del área forestal en los últimos 20 años por medio de la generación de cartografía de alta calidad. Los registros históricos señalan que una de las primeras aplicaciones de imágenes satelitales Landsat TM en el estudio de bosques se remontan a Congalton *et al.* (1993), quienes produjeron bases de datos y mapas de bosques de coníferas relacionados con la producción de madera. Fiorella y Ripple (1993), desarrollan una clasificación de estados sucesionales por medio de imágenes Landsat TM. Navarro *et al.* (2008) evaluó la mortalidad de bosques de *N. antártica* por medio de imágenes satelitales Landsat TM y +ETM. Después de un incendio forestal catastrófico, Riaño *et al.* (2002) utilizó imágenes AVIRIS para evaluar la regeneración de las especies utilizando técnicas multitemporales. Lencinas y Mohr-Bell (2007) estimaron edades en plantaciones en la

provincia de Corrientes Argentina por medio de imágenes Landsat TM. Todas aplicaciones logradas por medio de la interacción entre energía y objeto, apuntando a la determinación de la productividad de bosques.

En base a lo anterior, el presente estudio tuvo por objetivo identificar la productividad de sitio para rodales de la especie *N. dombeyi* por medio de funciones de herramientas de teledetección espacial. Con ello se busca dar a conocer las virtudes de la tecnología satelital en los estudios de productividad de especies forestales en base a fuentes confiables de información que permitan la toma de decisiones sobre las actividades silviculturales que aseguren la sustentabilidad del recurso.

## Material y métodos

### Área de estudio.

El estudio se desarrolló en la comuna de Curarrehue, localidad precordillerana ubicada en la provincia de Cautín, Región de La Araucanía, con una superficie total de 116.500 hectáreas (figura 1). El clima predominante presenta tres condiciones, existiendo épocas de meses secos, meses lluvioso (3.500 a 4.000 mm/año) y otros de precipitaciones en forma de nieve, lo cual permite clasificar el área como zona con clima mediterráneo frío (DGF-Conama 2006, CEPAL 2012).

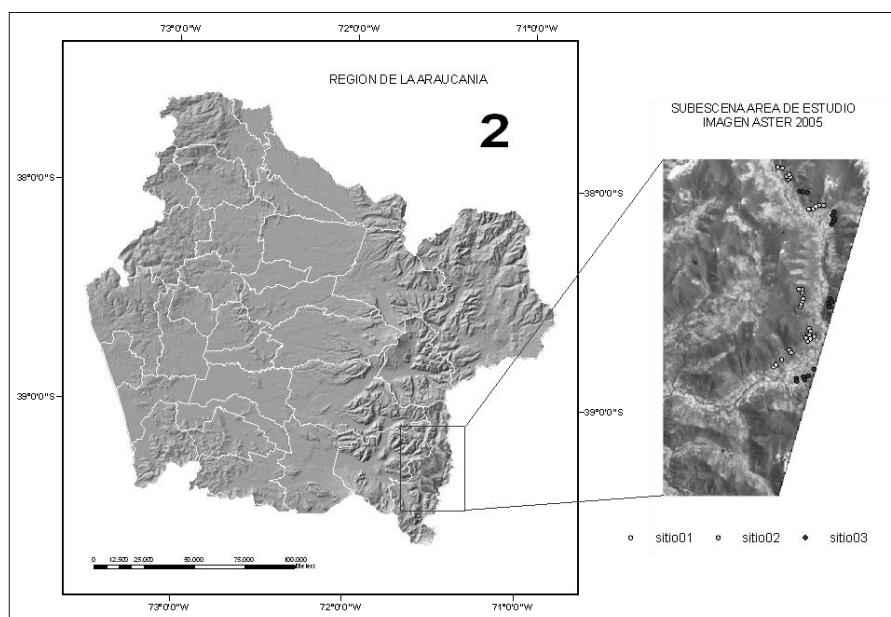


Figura 1. Mapa del área en estudio

*Información vectorial y raster requerida.*

El método propuesto requirió de una imagen satelital ASTER, con una resolución espacial de 15 metros, resolución radiométrica de 8, resolución espectral de a lo menos 4 bandas incluida IRC (infrarrojo cercano). La imagen fue adquirida con correcciones espectrales y espaciales, la época de adquisición fue estival a fin de evitar alteraciones atmosféricas mayores y registrar así la energía reflejada en la época de máxima actividad fisiológica según (Lencinas y Mohr-Bell 2007). Se utilizó un set de funciones de índice de sitio para *N. dombeyi* construidos por Esse *et al.* (2007). La información vectorial correspondió al catastro de recursos vegetacionales de Chile (CONAF *et al.* 1999), y coberturas vectoriales de unidades muestrales con registro de alturas dominantes para cada clase de sitio. Los softwares para el tratamiento de información raster y vectorial fueron ERDAS v8.7 y ArcGis v10.x, para el análisis estadístico se usó el software R. En relación a la base geodésica, esta correspondió a la proyección UTM, Datum WGS84 y Huso 18 sur.

*Procesamiento de los datos satelitales.*

A fin de establecer la relación entre la variable biofísica altura dominante (índice de sitio) y los valores espectrales de los datos satelitales ASTER se utilizó el ND (nivel digital). Para poder obtener las mejores correlaciones entre variables se procedió a obtener índices y transformaciones espectrales. Estas fueron:

**Banda Infrarroja imagen ASTER (B4) (1)**

**NDVI = IRC – Rojo / IRC + Rojo (2)**

**TNDVI =  $\sqrt{\text{IRC} - \text{Rojo} / \text{IRC} + \text{Rojo}} + 0,5$  (3)**

**Transformación de Componentes Principales (TCP) (4)**

Donde, (1) NDVI corresponde al índice de vegetación normalizado; IRC corresponde a la longitud de onda infrarroja cercana; Rojo correspondiente a la longitud de onda roja; (2) TNDVI conocido como el índice de vegetación normalizado modificado en 0,5 unidades.

*Índice de sitio para coigüe.*

La información referente al índice de sitio correspondió a un conjunto de polígonos vectoriales de altura dominante construidos sobre la base del modelo de crecimiento biológico propuesto por Chapman-Richard (5). La información incluyó curvas índices de 20, 18 y 16 metros con las cuales se correlacionaron los valores espectrales de la imagen original procesada. Para luego extrapolar la información a un área de mayores dimensiones a través del módulo 'Model Maker' de ERDAS v8.7.

$$H = a (1 - e^{-bt})^{1/c} \quad (5)$$

Donde H = altura dominante (m); a = parámetro de la asíntota; b = factor de escala que modifica la tasa de crecimiento; t = edad (años); c = parámetro que determina la forma de la curva.

*Ajuste y análisis de datos.*

Para las relaciones entre los índices de vegetación y el índice de sitio se graficaron los datos de altura dominante (I.S) v/s los valores de los pixeles correspondientes a los índices construidos, esto fue aplicado de igual forma a las transformaciones espectrales. Posteriormente se eligieron los mejores modelos en base al coeficiente de correlación de Pearson (r) para un nivel de probabilidad de  $P < 0,01$ . A fin de evaluar el modelo seleccionado se aplicaron el coeficiente de determinación ( $r^2$ ), la raíz del error medio cuadrático (RMSE) (6) y como medida de sesgo se utilizó la diferencia agregada (DIFA) (7).

$$RMSE = \sqrt{\sum(o - e)^2 / n} \quad (6)$$

$$DIFA = \sum(o - e) / n \quad (7)$$

Donde o = observado; e = estimado; n = número de observaciones.

**Resultados***Procesamiento de datos satelitales.*

La figura 2 muestra cada una de las escenas de la imagen ASTER original correspondientes a los índices NDVI, TNDVI, la banda (4) IRC y los componentes principales 1-2-3 de la transformación espectral. De cada una se obtuvo la relación ND v/s índice de sitio. La cual fue graficada para determinar la correlación entre variables y determinar el modelo a ajustar del cual se extrajeron los parámetros de ajuste. La tabla 1, muestra los valores medios de ambas variables analizadas para cada imagen producida.

La gráfica de las variables de reflectancia con las curvas de índice de sitio, muestra las relaciones para cada imagen generada (figura 2). Los modelos ajustados y sus correspondientes parámetros estimados se muestran en la tabla 2.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos estimados para los ND de cada imagen generada.

Valores estimados	B4	NDVI	TNDVI	CP1	CP2	CP3
Media	105,34	191,92	191,57	67,97	106,35	173,59
D. Estándar	16,07	6,90	9,21	6,75	13,07	1,59
CV%	15,26	3,60	4,81	9,94	12,29	0,92

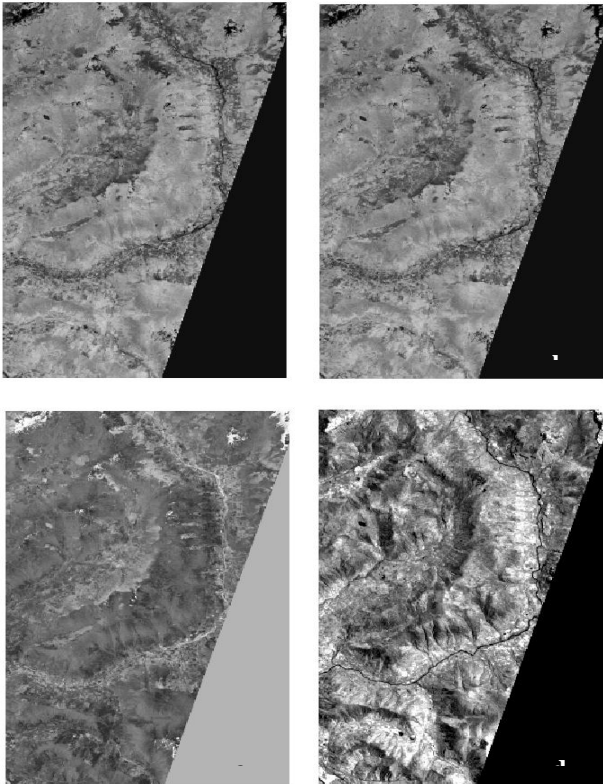
En base al análisis de error y sesgo, se decidió seleccionar el modelo ajustado por medio del segundo componente de la imagen ASTER transformada por medio del algoritmo de componentes principales. El modelo estimador del sitio mostró un coeficiente de correlación de 0,619 unidades y un coeficiente de determinación de 0,3831 para un nivel de probabilidad de  $P < 0,01$ .

$$I. S (m) = 24,1317143247861 - 6,21700366958595E-02 * ND(CP02) \quad (8)$$

Finalmente la imagen fue clasificada para toda el área en base a tres grupos, con ello se buscó clusterizar las categorías de sitio para cada curva índice original con un nivel de probabilidad  $P<0,05$ .

Tabla 2. Parámetros de ajuste, errores y sesgo estimados.

Imagen	Modelo	r	r <sup>2</sup>	RMSE%	DIFA%
B4	12,1143498293294 + 5,13172983587563E-02*B4 (ND)	0,628	0,394	5,77	0,05
NDVI	-2,64629278934574 + 0,10507777352808*NDVI (ND)	0,552	0,304	6,18	0,04
TNDVI	7,11874033159291 + 5,42945103156727E-02*TNDVI	0,381	0,145	6,86	0,04
CP01	9,49617874620093 + 0,118043663011952*CP01	0,607	0,368	5,89	0,05
CP02	24,1317143247861 -6,21700366958595E-02*CP02	0,619	0,383	5,82	0,04
CP03	38,8570578545395 -0,122917186642038*CP03	0,149	0,022	7,33	0,06



**Figura 2.** Imágenes transformadas en: a.) NDVI (índice de vegetación normalizado); b.) TNDVI (índice de vegetación transformado); c.) Componentes principales; y d.) Banda infrarroja de la imagen ASTER.

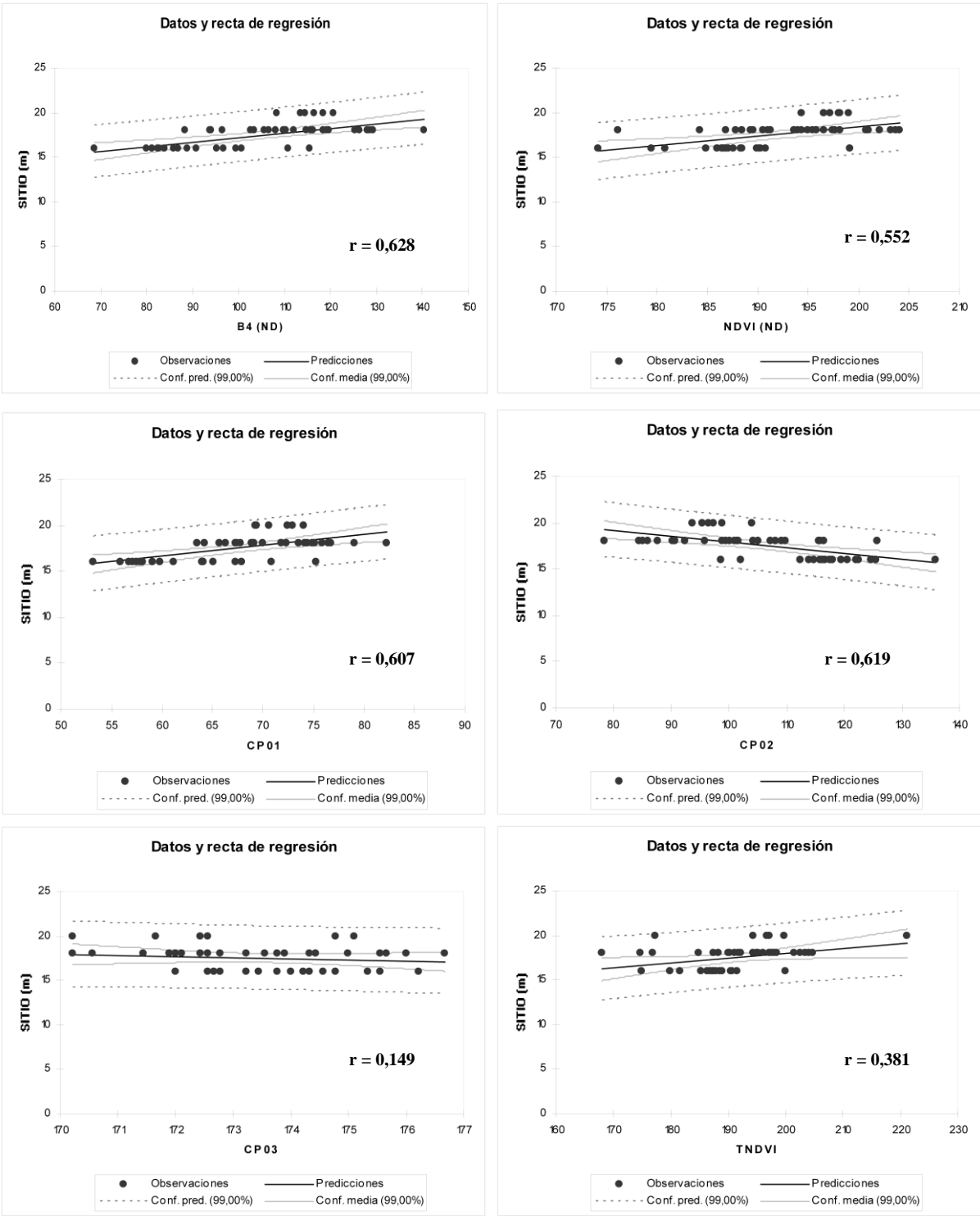


Figura 3. Gráfica de correlaciones entre índice de sitio (m) y niveles digitales para cada imagen con  $P<0,01$ .



Figura 4. Imagen clasificada en base al modelo de altura dominante (20, 18 y 16 metros).

### Discusiones

Este análisis exploratorio, basado en la metodología propuesta, permite identificar aquellas variables que se relacionan la productividad de bosques naturales coetáneos con información radiométrica aportada por las imágenes de satélite, demostrando que existe la posibilidad de generar modelos predictores de dicha productividad en áreas donde no existen estudios de campo que expliquen la calidad del sitio en el cual crecen y se desarrollan las especies forestales.

Si bien, las variables relacionadas no explican del todo el comportamiento de la productividad del sitio, sin embargo, se encuentran dentro de los valores y rangos similares a los encontrados en estudios similares (Vallejos 1999, Mena y Montecinos 2006, Mingdong *et al.* 2006) demostrando que puede ser una metodología válida de análisis cuando no se cuenta con información de campo.



Basado en lo anterior, es recomendable considerar en futuros estudios incorporar otras variables al análisis, en lo posible aquellas que tienen relación directa con el suelo como son la textura, profundidad del suelo, humedad, drenaje y Ph. Además, dependiendo de la escala de trabajo, una buena opción es considerar aquellas variables climáticas que explican la distribución de las especies forestales a gran escala, como precipitación, temperatura, humedad relativa y evapotranspiración. Todas variables que pueden ser modeladas y representadas a través de un sistema de información geográfica (Hijmans *et al.* 2005, Esse *et al.* 2013).

En este contexto, Schlatter y Gerding (1995), desarrollaron un sistema de ordenación de la tierra basado en factores biofísicos el cual considera en primer lugar el macroclima, seguido del clima local y las propiedades físicas, químicas y nutritivas del suelo. El resultado propone una subdivisión en zonas de crecimiento (clima), distritos de crecimiento (clima) y áreas de crecimiento (clima y suelo). De igual forma, Esse *et al.* (2013) proponen la espacialización de la productividad de bosques secundarios de *N. dombeyi* en 5 zonas edafoclimáticas homogéneas, basadas en un modelo de agrupamiento k-medias y CART a través de herramientas de análisis multicriterio y análisis espacial SIG.

El acelerado desarrollo de la tecnología SIG y del campo de la teledetección espacial abren variadas posibilidades para futuras investigaciones en el área, especialmente en temas relacionados con la productividad de bosques naturales, sustentabilidad del recurso y los múltiples servicios ecosistémicos que de él se pueden obtener.

En Chile, los estudios de productividad son muy escasos, siendo los modelos existentes de características locales en términos de superficie, por lo cual no logran representar plenamente la situación del recurso actual. Por ello, los resultados preliminares de este estudio permiten una mayor visión a las múltiples posibilidades que presenta la teledetección en el desarrollo futuro del área forestal.

#### Agradecimientos

El autor agradece al programa de Doctorado Nacional de CONICYT Chile, al proyecto 062/2011 del Fondo de Investigación del Bosque nativo de CONAF, al Dr. Celso Navarro de la Universidad Católica de Temuco y Dr. Víctor Sandoval de la Facultad de Ciencias Forestales y Recursos naturales de la Universidad Austral de Chile, por sus comentarios y sugerencias.

#### Referencias

- Avery, T., y H. Burkhart. 1994. Forest Measurements. New York, USA. McGraw-Hill. 4th Edition. 408 p.
- Carmean, W. 1979. A comparison of site index curves for northern hardwood species. USDA Forest Service Research Paper NC-160.

- CEPAL, 2012. La Economía del Cambio Climático en Chile. Documento de proyecto. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago, Chile. 367 pp.
- CONAF, CONAMA, BIRF, Universidad Austral de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad Católica de Temuco. 1999. Proyecto Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile. Santiago, Chile. 88 pp.
- Congalton, R., K. Green, y J. Teply. 1993. Mapping old growth forest on National Forest and Park Lands in the Pacific Northwest from remotely sensed data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 59: 529-535 pp.
- Covarrubias, R., y A. Contreras. 2004. Variación en los microartrópodos del suelo, por manejos forestales de raleo selectivo y cortes en hoyos de luz. Bosque, 25: 103-116.
- DGF-CONAMA. 2006. Estudio de variabilidad climática para el siglo XXI. Informe Final. Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente. Santiago, Chile. 71 pp.
- Donoso, C. 1981. Ecología Forestal, el Bosque y su Ambiente. Editorial Universitaria. Univ. Austral de Chile. Santiago. 369 p.
- Esse, C., C. Navarro, y J. Pinares. 2007. Curvas de índice de sitio para *Nothofagus dombeyi* en la zona Preandina, Provincia de Cautín IX Región, Chile. Bosque 28: 142-151.
- Esse C, Donoso PJ, V. Gerding, y F. Encina-Montoya. 2013. Determination of homogeneous edaphoclimatic zones for secondary forests of *Nothofagus dombeyi* in south-central Chile. Cien. Inv. Agr. 40(2): 351-360.
- Fiorella, M., y W. Ripple. 1993. Determining successional stages of temperate coniferous forests with Landsat satellite data. Photogramm. Engineering Remote Sensing. 59: 239-246.
- García, O. 1983. A Stochastic Differential Equation Model for the Height Growth of Forest Stands. Biometrics 39: 1059-1072.
- Hampf, F. 1965. Site index curves for some forest species in the eastern United States. Forest Service, Eastern Region, Upper Darby, Pa.
- Hijmans, R, S. Cameron, J. Parra, G. Jones, y A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 25: 1965–1978.
- Lencinas, J.D., y D. Mohr-Bell. 2007. Estimación de clases de edad de las plantaciones de la provincia de Corrientes, Argentina, con base en datos satelitales Landsat. Bosque 28: 106-118.
- Mena, C. y R., Montecinos. 2006. Comparación de redes neuronales y regresión lineal para estimar productividad de sitio en plantaciones forestales, utilizando geomática. Bosque 27: 35 - 43.
- Mingdong, M., J. Hong, L. Shirong, Z. Chunquan, L. Yuejian, y W. Jinxi. 2006. Estimation of forest-ecosystem site index using remote sensed data. Acta ecológica Sinica. 26: 2810-2816.

- Navarro, R.M., M. Rosenfeld, J. Pérez-Aranda, E. Pedrón, J.R. Guzmán, R. Hernández, y L. González. 2008. Evaluación de la mortalidad de bosques de ñirre (*Nothofagus antarctica*) en la Patagonia chilena mediante imágenes Landsat TM y ETM+. Bosque 29: 65-73.
- González L. 2008. Evaluación de la mortalidad de bosques de Ñirre (*Nothofagus antartica*) en la Patagonia Chilena, mediante imágenes Landsat TM y ETM+. Revista Bosque. Vol 29: 65-73 pp.
- Ortega A, y G. Montero. 1988. Evaluación de la Calidad de las Estaciones Forestales. Revisión bibliográfica. Icona, Madrid. Ecología 2: 155-184.
- Prodan, M., R. Peters, F. Cox, P. Real. 1997. Mensura Forestal. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica. 586 p.
- Riaño, D., E. Chuvieco, S. Ustin, R. Zomer, P. Dennison, D. Roberts, y F. Salas. 2002. Assessment of vegetation regeneration after fire through multitemporal analysis of AVIRIS images in the Santa Monica Mountains. Remote Sensing of Environment. 79: 60-71.
- Schlatter, J.E., y V. Gerding. 1995. Método de clasificación de sitios para la producción forestal, ejemplo en Chile. Bosque 16: 13-20.
- Vallejos, O. 1999. Dasometría para Ingenieros Forestales. Talca, Chile, Universidad de Talca. 195 p.